

# Sensor de potencia de RF de ultra-bajo coste basado en diodo Schottky.

José-María Zamanillo Sainz de la Maza, Denis Trunin, Constantino Pérez-Vega.

[jose.zamanillo@unican.es](mailto:jose.zamanillo@unican.es), [denisyatka@hotmail.com](mailto:denisyatka@hotmail.com), [perezvr@unican.es](mailto:perezvr@unican.es)

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones Universidad de Cantabria Av. de los Castros s/n.39005 Santander (Cantabria)

**Abstract-** An ultra-low cost and high performance RF and microwave power sensor based on a “zero-bias” low-cost plastic package Schottky diode for research and educational purposes have been developed. A high impedance video output has been added to the detector circuitry in order to make compatible this device with the rest of the circuitry available in a basic RF laboratory. The able to detect RF power in a wide frequency range (0.5-3 GHz) coupled with the ultra-low cost makes this power detector interesting tool to use by users at any level.

## I. INTRODUCCIÓN

Generalmente, los recursos, con los que cuentan las universidades españolas para dotar de instrumentación básica a los laboratorios docentes de radiofrecuencia y microondas, son bastante escasos. Ello es debido por una parte, al gran número de puestos de medida que se necesita cubrir, y por otra, al alto coste de la instrumentación de RF y microondas.

Por esta razón, nuestro grupo ha optado por desarrollar un detector de potencia hasta 3 GHz robusto, de similares prestaciones a los detectores comerciales y de bajo coste.

El circuito detector aquí presentado ha sido diseñado teniendo en cuenta, que los principales usuarios del mismo serán alumnos, primando la robustez del mismo, y por otro en producir un dispositivo de bajo coste. El detector se basa en la utilización de un diodo Schottky del tipo “zero-bias”, el cual será el encargado de rectificar la tensión de RF en corriente continua detectable mediante un voltímetro digital portátil de bajo coste. Dicha corriente, y por tanto la tensión (o corriente) detectada a la salida será proporcional a la potencia de RF.

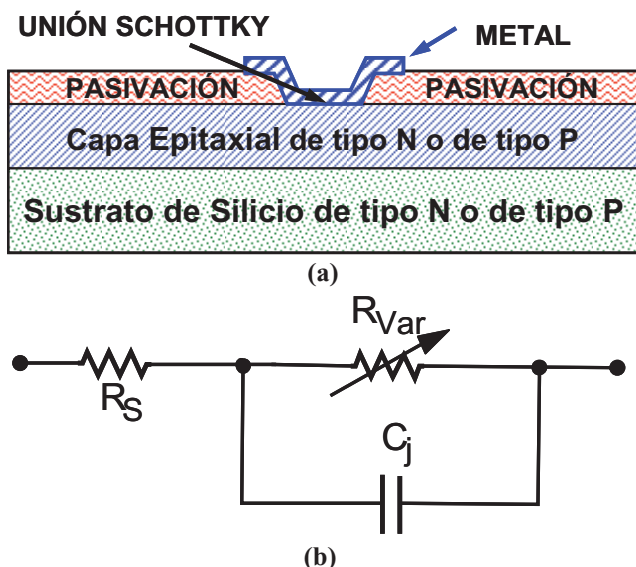


Fig. 1. (a) Corte esquemático de un diodo Schottky de Si.  
(b) Circuito de pequeña señal de un diodo Schottky.

Este tipo de diodo ha sido utilizado para medir y detectar la potencia de RF durante las últimas dos décadas [1-3]. El diodo Schottky “zero-bias” seleccionado para el diseño y construcción del detector de RF presentado aquí, ha sido el modelo HSMS-2860 de la firma Agilent Technologies, por su disponibilidad y excelente relación calidad-precio (inferior a los 2€). Aunque el fabricante no recomienda el uso de este tipo de diodos sea utilizado a frecuencias inferiores de 1.5 GHz debido a su pérdida de sensibilidad [4], el circuito detector aquí presentado ha sido diseñado, simulado y medido para funcionar correctamente en el rango de frecuencias de 0.5 a 3 GHz, utilizando como dispositivo visualizador un voltímetro digital portátil de bajo coste.

En la Fig. 1 (a) se muestra el corte esquemático de un diodo Schottky de Si, como los utilizados por Agilent Technologies y en la Fig. 1 (b) su circuito equivalente.  $R_S$  representa la resistencia parásita serie del diodo,  $C_j$  es la capacidad de unión según el modelo de SPICE [5], y  $R_{Var}$  para los diodos investigados viene dada por la siguiente expresión:

$$R_{Var} = \frac{8.33 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot T}{I_S} \quad (1)$$

Donde  $n$  es el factor de idealidad del diodo,  $T$  es la temperatura en Kelvin e  $I_S$  es la corriente de saturación del diodo.

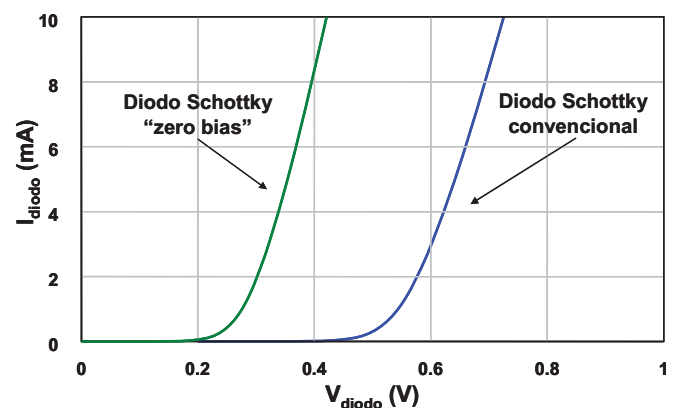


Fig. 2. Comparativa entre la curva característica I-V de un diodo Schottky “zero-bias” frente a un diodo Schottky convencional.

La Fig.2 muestra una comparativa entre la curva característica tensión corriente de un diodo Schottky convencional y uno del tipo “zero-bias”, como se puede mostrar en la misma la tensión de contacto de este último es inferior a la del diodo convencional.

## II. EL CIRCUITO DETECTOR

La Fig. 3 muestra el esquema eléctrico del detector desarrollado en el presente trabajo

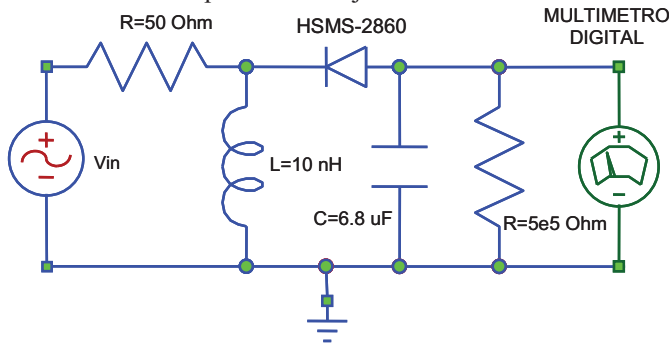


Fig. 3. Esquema eléctrico del detector de RF a diodo Schottky desarrollado (la resistencia de  $5 \cdot 10^5$  actúa como resistencia de video).

Un funcionamiento muy simplificado del circuito detector, es el mostrado en la Fig. 4. Como puede observarse en la misma, la corriente rectificada detectada por el diodo, es regulada por una capacidad en paralelo de  $6.8 \mu\text{F}$  tal como se muestra mediante una línea discontinua. Además, se ha añadido una bobina en paralelo de  $10 \text{ nH}$  para que actúe como un “Choke” ideal para la RF en la banda de operación.

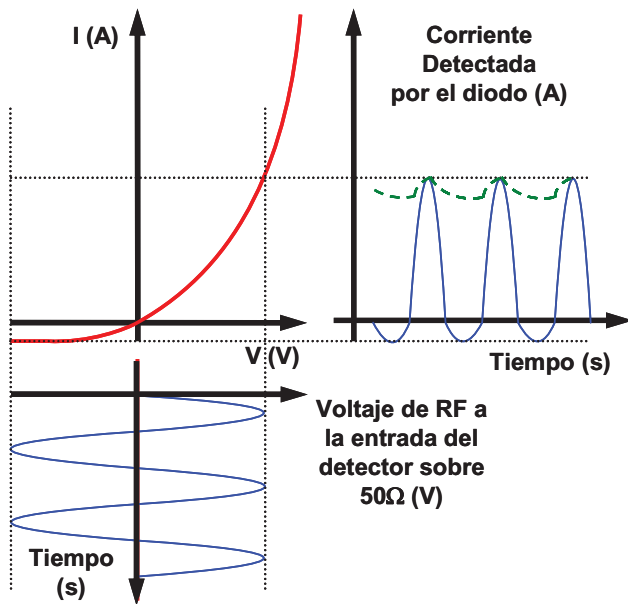


Fig. 4. Corriente de DC detectada por un detector de RF basado en un diodo Schottky “zero-bias” (línea discontinua) utilizando una resistencia de alta impedancia (resistencia de video).

La Fig. 3 muestra el esquema eléctrico del detector desarrollado, el comportamiento del mismo ha sido simulado utilizando dos herramientas distintas: la primera basada en análisis en el dominio del tiempo, PSPICE [5-6], y la segunda basada en el balance armónico, AWR Microwave Office [7]. Con ambos se han obtenido resultados similares tal como se muestra en las Fig. 5 y Fig. 6. En la Fig. 5 se muestra el rango dinámico obtenido para este detector (60 dB) en una simulación efectuada con PSPICE cuando la frecuencia del generador es de  $1 \text{ GHz}$ . Dicho resultado se halla en concordancia con los resultados teóricos mostrados en [3] y con las medidas efectuadas en el laboratorio que se mostraran en el epígrafe siguiente. Además, en dicha figura, se muestran en detalle las dos regiones típicas de trabajo del detector Schottky [8]: la zona cuadrática, y la zona lineal.

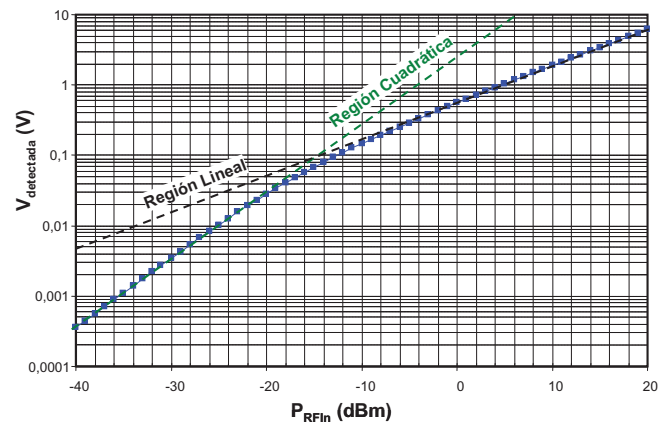


Fig. 5. Simulación en PSPICE del circuito mostrado en la Fig. 3 a  $1 \text{ GHz}$ .

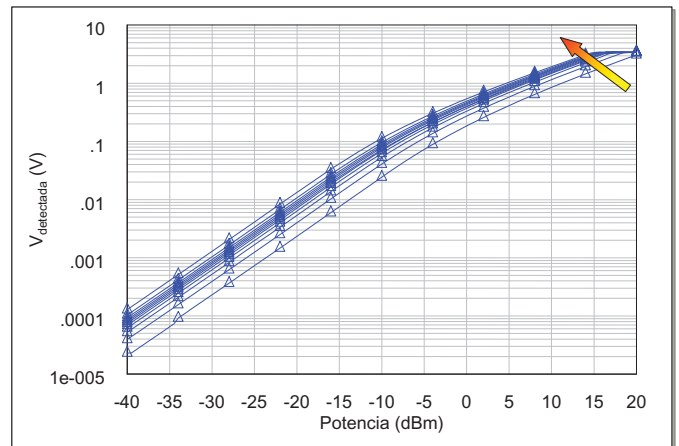


Fig. 6. Simulación en AWR Microwave Office del circuito detector, la flecha indica el barrido frecuencial de  $0.5 \text{ GHz}$  a  $3 \text{ GHz}$  en pasos de  $0.25 \text{ GHz}$ .

Cuando el detector trabaja en la zona cuadrática, éste proporciona una tensión de video<sup>1</sup>, proporcional a la potencia de RF a la entrada (ó al cuadrado del voltaje de RF a la entrada sobre  $50 \Omega$ ) cuando ésta es de bajo nivel. En cambio cuando el detector opera en zona lineal, la tensión detectada es directamente proporcional al voltaje de RF suministrado al mismo. En la Fig. 6 se muestra, la simulación efectuada con Microwave Office del circuito detector mostrado en la Fig. 3, la flecha indica el incremento del barrido en frecuencia de  $0.5 \text{ GHz}$  a  $3 \text{ GHz}$  en pasos de  $0.25 \text{ GHz}$ .

La diferencia de un orden de magnitud en la tensión detectada entre la simulaciones realizadas en PSPICE y en Microwave Office cuando el diodo trabaja en zona cuadrática, se debe a que en la simulación realizada en PSPICE tanto la bobina de  $10 \text{ nH}$  como el condensador de  $6.8 \mu\text{F}$  se han considerado como elementos ideales por desconocerse su circuito equivalente de parámetros concentrados en RF. En cambio en la simulación de Microwave Office se han utilizado los parámetros de scattering suministrados por los fabricantes tanto para la bobina de Coilcraft modelo 0805HT-6N8T, como para el condensador de Murata de la serie GQM18, en concreto el modelo GQM1885C2A6R8DB01 con lo que ésta simulación es mas realista que la realizada en PSPICE.

<sup>1</sup> Por tensión de video, aquí se entiende la tensión de alta impedancia medida por el voltímetro digital a la salida del detector.

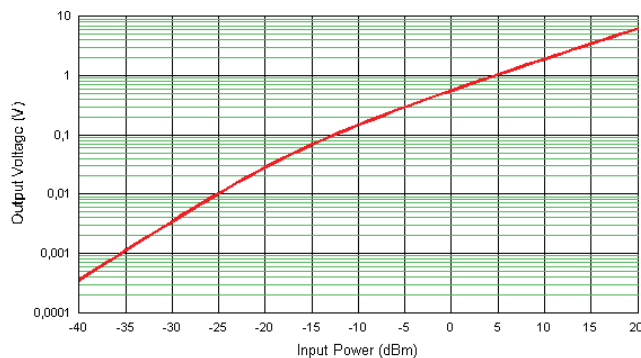


Fig. 7. Simulación del circuito detector con el programa de ayuda AppCAD de Agilent Technologies.

En cambio cuando el diodo Schottky trabaja en la zona lineal este hecho no es muy relevante, puesto que como se puede apreciar en las Fig. 4 y Fig. 5 los valores obtenidos son muy similares en ambos simuladores. Además, se ha utilizado el programa de ayuda “freeware” suministrado por Agilent Technologies AppCAD [9] para obtener la gráfica de la tensión de salida en función de la potencia de RF suministrada al detector, como se muestra en la Fig. 7. Dicha gráfica es muy similar a la obtenida en la simulación con PSPICE, aunque desafortunadamente AppCAD no suministra el rango frecuencial de operación del detector.

### III. LA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO

Una vez efectuado el diseño y simulación del circuito impreso se diseñó una placa de circuito impreso en fibra de vidrio FR4 de 1/16” (1,59 mm) de espesor de sustrato, 0,035 mm de espesor de metalización y constante dieléctrica 4,6 del fabricante COVENCO, la anchura de la línea microstrip de entrada ha sido optimizada para que presentase 50Ω de impedancia característica a la frecuencia de 1,5 GHz.

La Fig. 8 muestra una fotografía de la placa de circuito impreso montada en una caja con los componentes soldados, así como el conector BNC para la entrada de la RF, y un conector microbanana utilizado para extraer la señal de DC proporcional a la potencia de RF. La Fig. 9 muestra una fotografía de la caja que contiene el circuito detector de RF listo para su utilización.

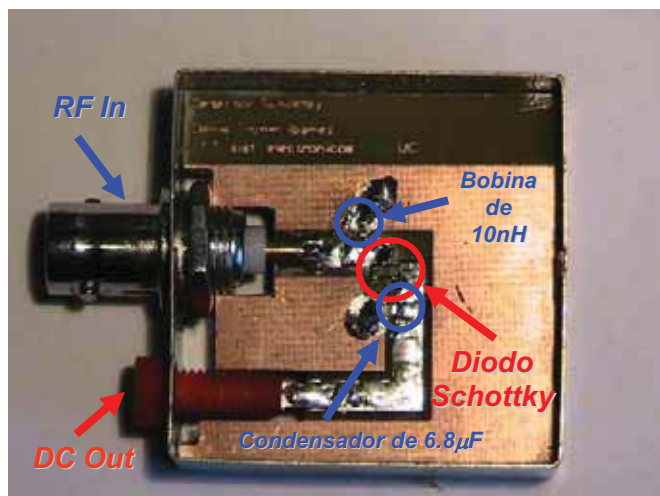


Fig. 8. Fotografía del circuito detector a diodo Schottky desarrollado, en la que se muestran los componentes del mismo y los conectores de entrada salida.



Fig. 9. Fotografía del circuito detector a diodo Schottky desarrollado en el presente trabajo montado y listo para su uso.

Se puede observar que se ha añadido un segundo conector microbanana soldado a la masa del circuito para facilitar el conexionado del mismo al voltímetro digital que se utilizará para visualizar la tensión a la salida del mismo.

### IV. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para el calibrado del dispositivo detector se ha utilizado un voltímetro digital de 6½ de precisión modelo Agilent 34401A, y un generador de RF modelo Agilent 8648C, todo ello controlado mediante un PC de control y el software WINEASYLAB desarrollado en MATLAB [10], tal como se muestra en la Fig. 10. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, mostrándose los valores del voltaje detectado en función de la potencia de RF suministrada al circuito detector. A partir de la misma, se ha calculado la sensibilidad del circuito detector en mV/mW. Una vez calibrado el equipo, no es necesario utilizar un voltímetro de altas prestaciones para medir la tensión a la salida del detector, sino que es suficiente utilizar un voltímetro portátil de bajo coste y consultar la Tabla 1 para obtener la potencia de RF detectada.



Fig. 10. Esquema de medida utilizado en el calibrado del detector Schottky desarrollado.

Para proceder a la validación experimental de las medidas se han utilizado los resultados simulados en PSPICE, Microwave Office y AppCAD. En la Fig. 11 se visualiza la gráfica de la tensión de continua detectada frente a la potencia de RF suministrada al detector para las frecuencias de: 0,5, 1, 2 y 3GHz. Como se puede observar en la figura, los resultados experimentales obtenidos se ajustan razonablemente bien a las tres simulaciones efectuadas mostradas en las Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7. La curva que mejor se ajusta a los resultados teóricos es la correspondiente a 3GHz lo que corrobora la recomendación efectuada por el fabricante de que este tipo de diodos ofrecen mejores resultados a partir de 1,5 GHz, debido al aumento de sensibilidad de los mismos.

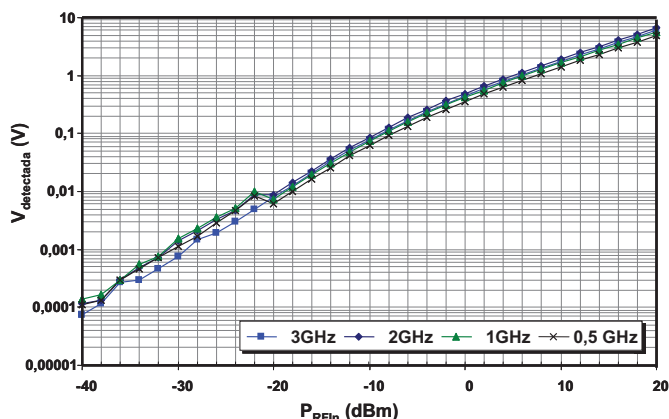


Fig. 11. Tensión de DC detectada experimentalmente mediante el diodo Schottky desde 0,5 GHz a 3GHz.

No obstante, el detector desarrollado presenta unos resultados razonables en un rango inferior de frecuencias. En la Fig. 12. se muestra una comparativa de la sensibilidad del detector calculada a partir de las medidas efectuadas en el laboratorio a 3GHz y los resultados proporcionados por el fabricante mediante el software AppCAD. Se puede observar un ajuste razonable para la zona cuadrática de operación del diodo detector, y un ajuste muy preciso en la zona lineal.

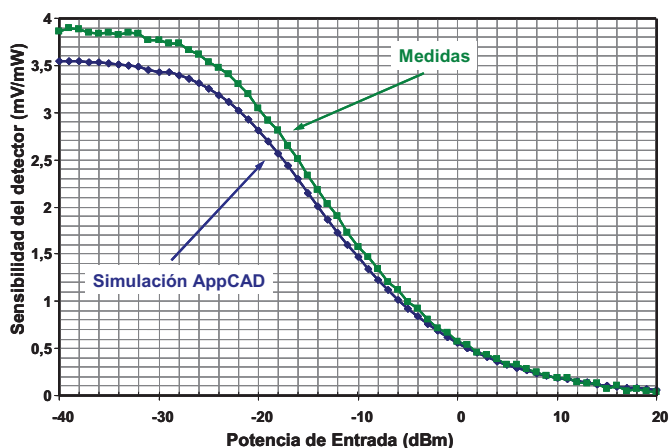


Fig. 12. Tensión de DC detectada experimentalmente a 3GHz mediante el detector desarrollado y simulado con AppCAD.

## V. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un detector de potencia de radiofrecuencia en el rango de 0.5 a 3GHz, de ultra-bajo coste (entorno a los 12€ incluyendo un voltímetro de prestaciones medias) utilizable tanto para tareas de investigación como en laboratorios docentes. Los resultados experimentales obtenidos mediante el detector desarrollado se hallan en concordancia con las tres simulaciones efectuadas en PSPICE, Microwave Office y AppCAD, así como en resultados presentados por otros autores [3].

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está parcialmente soportado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto TEC2005-07985-C03-01 y por la Unión Europea a través de la red de excelencia TARGET (IST-1-707893-NOE).

Tabla 1. Resultados obtenidos experimentalmente mediante el detector desarrollado a la frecuencia de 3 GHz

Potencia de entrada @ 3GHz (dBm)	Tensión detectada (V)	Sensibilidad del detector (mV/ $\mu$ W)
-40	0,000074	3,903
-38	0,000118	3,900
-36	0,000269	3,895
-34	0,000296	3,890
-32	0,000471	3,883
-30	0,000748	3,876
-28	0,001445	3,867
-26	0,001900	3,854
-24	0,003042	3,839
-22	0,004886	3,796
-20	0,007879	3,774
-18	0,012735	3,768
-16	0,020536	3,732
-14	0,032787	3,689
-12	0,051382	3,639
-10	0,078515	3,577
-8	0,116672	3,506
-6	0,168737	3,422
-4	0,238196	3,325
-2	0,329377	3,218
0	0,447718	3,097
2	0,600074	2,965
4	0,795104	2,824
6	1,043729	2,675
8	1,359719	2,521
10	1,760428	2,365
12	2,267721	2,208
14	2,909135	2,052
16	3,719350	1,900
18	4,742030	1,752
20	6,032157	1,612

## REFERENCIAS

- [1] D.L. Barnard, H. Black, and J.A. Thalmarm, "Automatic calibration for easy and accurate power measurements", Hewlett Packard., vol.43, pp.95-100, April 1992.
- [2] S. Wetenkamp, "Comparison of single diode versus dual diode detectors for microwave power detection", IEEE MTT- S Microwave Symp. Dig., Boston, MA, pp.361-363, May/June 1983.
- [3] R.G. Harrison, "Full nonlinear analysis of detector circuits using Ritz-Galerkin theory," IEEE MTT-S. Microwave Symp. Dig., Albuquerque, USA, pp.267-270, June 1992.
- [4] Hewlett Packard, "Communications Components Designer's Catalog", 5966-0895E (9/97), 1997
- [5] L.W. Nagel, "SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits", Memorandum M520, Elect. Res. Lab., College of Engineering, Univ. of California, Berkeley, CA, 1975.
- [6] G. Massobrio and P. Antognetti Semiconductor Device Modeling with SPICE. Second Edition., McGraw-Hill, 1993, ISBN 0-07-002469-3
- [7] Applied Wave Research, Inc. <http://www.mwoffice.com>
- [8] R.G. Harrison, X. Le Polozec, "Nonsquare Behavior of Diode Analyzed by the Ritz-Galerkin Method," IEEE Transactions on MTT, vol.42, pp.840-846, May 1994.
- [9] AppCAD <http://www.agilent.com/view/rf>
- [10] J.M. Zamanillo, C. Pérez-Vega, R. Toyos, A. Artabe, E. Guijarro, J. García, J. Quintial, R. Blanco, "WINEASYLAB: Software de Control para Instrumentación de Microondas con Aplicaciones a la Docencia", URSI, XV Symposium Nacional, Actas, pp 161-162, Zaragoza, Septiembre de 2000.